一种利用非福斯特匹配电路改进月面低频薄膜天线的设计方案

周嘉[1,2]、吴锋泉[2]、孙士杰[2]、索南本[2]、张骄[1]、陈学雷[2]

（1.山西大学，山西 太原 030000；2.中国科学院国家天文台，北京 朝阳区 100020）

摘要：月面低频射电观测具有巨大科学发现潜力，有望揭开宇宙黑暗和黎明时代秘密。本文针对于月背低频观测的天线及其匹配电路提出了一种新的设计方案，利用非福斯特匹配电路，大大减小了天线的物理尺寸，使之结构轻巧便于月面部署。首先，设计了一种轻巧、宽温度范围、具有易延展性、可折叠性、便于在月面部署的电小薄膜天线，其具有很好的全向性，在4-8MHz内增益小于1.92dB，半波束宽度大于83°，然后利用加载非福斯特匹配电路来改善其阻抗性能，将天线的电抗从高达-985.3Ω优化到-16.5Ω以内，最后采用等效电路进行了阻抗和噪声实测，其噪声功率密度水平在绝大部分频率范围内小于-150dBm/Hz，证实了该方案的可行性。

关键词：低频射电天文；月基天文观测；薄膜天线；电小天线；非福斯特匹配电路

中图分类号：P111.5　　　　**文献标识码：**A　　　**文章编号：**

0 引 言

时至今日，人类对于宇宙的观测在绝大部分电磁波段几乎达到全覆盖，然而在 10MHz 以下，受限于电离层对电磁波的折射、吸收、反射，以及无线电设备造成的大量电磁辐射干扰，在地面上进行观测非常困难。相较于地面，月球背面具有非常理想的电磁环境，因为月球可以阻隔来自地球的电磁辐射，所以低频射电天文已经成为公认的在月面特别是月背可以开展的最重要的科学研究之一。目前在国际上这方面的预先研究已经开展得如火如荼，形成如美国的 FARSIDE、LCRT，欧洲的 ALO 等多个方案[1-34]。

将设备运至月球需要高昂的成本，为了在月球背面开展低频射电观测，需要研制轻量化的天线和接收设备。考虑到月球表面没有大气，月壤的电导率很低，薄膜天线可能是一种比较适合月球射电观测的天线形式。我们提出了一种在月球背面铺设薄膜天线的方法，用于超长波信号的观测。但是，由于该频段波长可以达到十米到千米，如果从半波振子匹配接收来设计，相应的天线尺寸通常要求较大，薄膜天线虽然可以收卷携带，由于宽度受到收纳卷轴的限制，这样形成的窄条形天线的工作带宽较窄，不能实现宽带匹配。

为了实现较大的观测带宽，也可以采用尺寸小于波长的电小天线，同时电小天线具有很好的全向性，然而电小天线其本身辐射电阻偏小、电抗较大，导致辐射品质因数较高，难以

---

*基金项目：SKA专项（2022SKA0110100）资助，国家自然科学基金资助项目(12273070，11473044, 11973047)资助，中国科学院科研仪器设备研制项目（ZDKYYQ20200008）

收稿日期：2023-01-10；　修订日期：2023-01-26

作者简介：周嘉，男，硕士，研究方向：射电天文、天线与匹配电路。 Email:zj19960830@126.com

通信作者：吴锋泉，男，博士，研究方向：射电天文、宇宙学。Email：wufq@bao.ac.cn

通信作者：张骄，女，博士，研究方向：射电天文、阵列设计。Email：zhangjiao@sxu.edu.cn

与传输线匹配，能量很难传输出去，影响系统灵敏度[4][5]。在这种情况下，使用受限于增益带宽积理论的传统无源匹配网络来实现宽带化变得不可能[6][7]，拿本文设计的电小天线来举例，我们选取了整个频带内阻抗最优的频点即$10MHz$时的阻抗来说明问题，如果在阻抗最好的情况下都没有办法实现宽带匹配，那低频处的阻抗更不可能。取$\omega_1 = 3MHz$，$\omega_2 = 10MHz, \omega_0 = 6.5MHz, R = 33\Omega$，$C = 93pF$代入适用于电小天线的Bode-Fano约束条件公式（1）中

$$\int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{1}{\omega_0^2} In \frac{1}{|\Gamma(\omega)|} d\omega \leq \pi RC \quad (1)$$

求得$|\Gamma| \geq 0.944$，可见在 3-10MHz 带宽内，最理想的宽带匹配结果也是非常糟糕的。相对于传统的无源匹配网络，非福斯特匹配能够突破增益带宽积的限制，抵消天线的大电抗，大幅度改善电小天线的阻抗性能，进而增加工作带宽[8]。

非福斯特匹配突破了福斯特定理的限制。福斯特定理又称电抗定理[9]，适用于无损耗被动元件网络，这样的二端口网络的输入电抗随着频率的增加而增加，如公式（2）所示：

$$\frac{\partial X(\omega)}{\partial \omega} > 0, \frac{\partial B(\omega)}{\partial \omega} > 0 \quad (2)$$

这里，X 代表电抗、B 代表电纳，ω 为频率。一般的电容和电感元件属于福斯特元件，其电抗是频率的单调递增函数，相反地，如果某个元件电抗随频率增加而减小，那这个元件就称为非福斯特元件。一般来讲，非福斯特元件的阻抗值是负的，与消耗功率的正值元件相比，其反而会产出功率，这是被动元件所不可能实现的，所以非福斯特元件是由有源电路等效实现的，这个有源电路被称为负阻抗转换器（NIC），而非福斯特匹配本质上就是通过负阻抗转换电路将电容电感转换成负电容和负电感来抵消天线的等效电抗。

早在 1954 年，Linvill 就将 NIC 应用于有源滤波器领域[10]；Harries& Myers（1968）将非福斯特元件应用在天线领域，加载非福斯特匹配网络后的天线性能明显提高[11]。此后，有许多加载非福斯特匹配网络改善电小天线的工作，一些近期的应用如文献[12-13]。

本文针对于 3MHz-10MHz 月基低频射电天文观测，提出了一种加载非福斯特匹配网络的电小薄膜天线设计，并完成了天线以及非福斯特匹配网络的仿真及硬件制作，并用天线等效电路进行了实测，结果表明非福斯特大幅减小了电小薄膜天线的电抗，提高天线的性能，验证了整体方案的可行性。

1 天线设计

聚酰亚胺薄膜天线主要由上层的铜箔和下层的聚酰亚胺薄膜材料组成，其具有温度范围宽(-200℃-300℃)、稳定、轻便（密度 1.42g/cm³）、可收卷和展开的特性，这使得它在航天领域有着广泛的应用，同样，它与本文提出的方案有着很高的适配度，非常适合在月面使用。

天线目前预计采用月球车携带天线卷轴在月面进行铺设，天线宽度受天线卷轴宽度的限制。这里我们取宽度为 25cm，远小于波长，这使得其性能类似于鞭状天线，在天线整体为电小尺寸的情况下，其本身形状的改变对天线性能影响很小。我们采用结构简单、易于铺设的蝶形薄膜天线，并在末端加载了球冠，减小天线的末端效应，整体具有渐变的结构，制作简单且阻抗相对平滑。其结构示意图如图 1 所示。

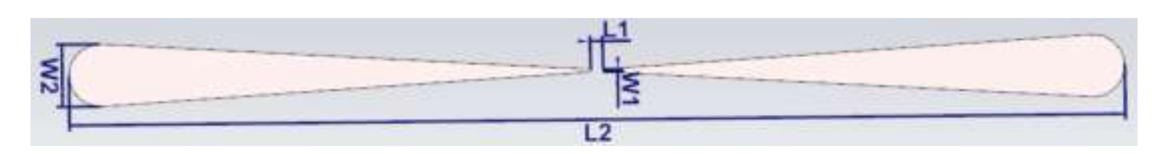


图 1　天线结构示意图

Fig.1　Antenna structure diagram

该薄膜天线的设计尺寸决定了天线的等效阻抗。非福斯特电路是一种较为敏感的电路，具有潜在的不稳定性，需要针对具体的天线设计。另一方面，非福斯特电路有一定的局限，这也对所能应用的天线给出了一些限制，因此天线和非福斯特匹配电路需要协同设计。

天线的阻抗如果大致能用单个无源器件值拟合较为方便，这样在设计非福斯特电路时可以减小使用到元器件的数量，避免相应的寄生效应。但是实际上天线的电抗难以完全用单个电容来拟合，通过图 2 天线虚部等效电容值可以看出，随着频率的升高等效电容逐渐增大，所以我们采用电容串联电感的方式来拟合天线的阻抗，并用 HFSS 和 ADS 软件联合仿真进行调试。

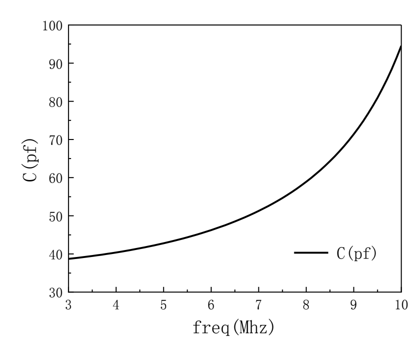


图 2　天线虚部等效电容值

Fig.2　Equivalent capacitance value of antenna imaginary part

保证非福斯特电路稳定最简单的办法是让天线在工作频段内电抗始终为正或为负，对于我们的天线来说要保证天线虚部始终呈容性，即天线电抗在工作频带为负，这在一定程度上限制了天线的最大尺寸。

综合上述要求，我们最终确定的天线尺寸如下，其中 L_1 和 L_2 为馈电端和天线整体的长度，W_1,W_2 为天线馈电端和末端的宽度：

表 1 天线尺寸

Tab.1 Antenna size

L_1(mm)	L_2(mm)	W_1(mm)	W_2(mm)
50	5010	10	250

为了保证仿真结果的准确性，我们使用 HFSS 和 CST 进行优化仿真，它们在仿真电小天线方面具有很高的准确度，两款软件也可以相互验证，天线的阻抗如图 3 中标号为 original 的点划线所示，在图中我们可以看出在整个频段内阻抗均不太理想，难以与 50 欧姆的传输线匹配。在工作频段内，阻抗虚部整体为负，阻抗实部整体偏小，实部特性类似于电小鞭状天线，阻值与频率平方成正比，这也就说明了一个问题，尽管我们后面使用非福斯特减小天线的虚部，但实部依然与 50 欧姆有所差距，可以使用变压器或者匹配网络来调整天线实部，或是适当的加入一些损耗，但这会影响天线的增益，要进行折中的取舍。

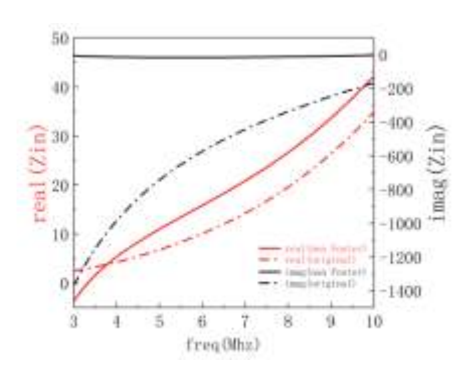


图 3 天线阻抗及加载非福斯特后的阻抗

Fig.3 Antenna impedance and impedance after non-Foster loading

表 2 天线阻抗及加载非福斯特后的阻抗

Tab.2 Antenna impedance and impedance after non-Foster loading

	4MHz	6MHz	8MHz
real（ori）	4.3	10.1	19.6
real（n-F）	5.3	15.8	26.6
imag（ori）	-985.3	-573.5	-337.7
imag（n-F）	-14.2	-16.4	-12.4

图 4 为天线在理想环境下的线性辐射方向图，因为本天线属于电小天线，其方向图类似标准的短偶极子方向图，具有很好的全向性。

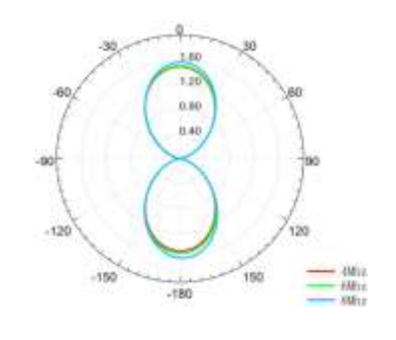


图 4　天线线性辐射方向图

Fig.4　Antenna linear radiation pattern

2 非福斯特电路设计

非福斯特电路表现为负电抗斜率，与传统无源器件电抗值随着频率升高而增大的趋势相反，突破了增益带宽积的限制，这也是它能够在一定频率范围内抵消电小天线大电抗的根本原因。

本文设计了基于晶体管放大器的浮地型电压反相非福斯特电路，其原理图如图 5 所示，其中两个晶体管以反馈的方式连接，使负载Z_L两端电压反相，并作为有源器件驱动电流从较低的电位到较高的电位，最终使得非福斯特电路两端阻抗为负载阻抗的负值。

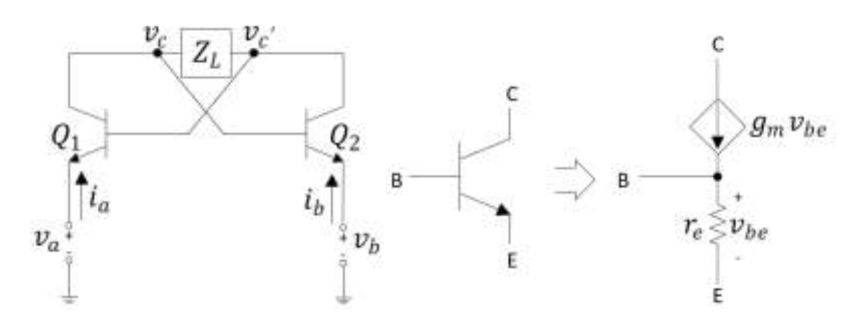


图 5　非福斯特原理图及晶体管等效电路

Fig.5　Non-Foster schematic and transistor equivalent circuit

首先我们假设负载阻抗Z_L与等效电路右侧的b端口串联。如果非福斯特电路将负载阻抗Z_L转换成-Z_L，则从左端口a向右看去输入阻抗为 0 欧姆,即非福斯特匹配电路将负载阻抗成功抵消。根据节点分析法，可以得到如下方程：

$$\frac{1}{r_e}v_a-\frac{1}{r_e}v_c'=-i_a \tag{3}$$

$$-\left(\frac{1}{Z_L}+\frac{1}{r_e}\right)v_b+\frac{1}{r_e}v_c=0 \tag{4}$$

$$\left(\frac{1}{r_e}-g_m\right)v_a+g_m v_b+\left(\frac{1}{Z_L}-g_m\right)v_c+\left(g_m-\frac{1}{r_e}-\frac{1}{Z_L}\right)v_c'=0 \tag{5}$$

$$-\left(\frac{1}{r_e}-g_m\right)v_b+g_m v_a+\left(g_m-\frac{1}{r_e}-\frac{1}{Z_L}\right)v_c+\left(\frac{1}{Z_L}-g_m\right)v_c'=0 \tag{6}$$

$$Z_{in}=\frac{v_a}{i_a}=2g_m r_e Z_L-2Z_L-2r_e \tag{7}$$

其中，$g_m r_e=1$, 又三极管跨导g_m接近无穷大，所以$Z_{in}\to 0$。

整体电路设计中，晶体管放大器的选型极其重要，它是整个电路中噪声的主要来源，所以要尽量选取低噪声系数的晶体管，综合考虑之下，我们选取了 NE68133 作为负阻抗变换的有源器件，并根据数据手册选择了$I_c=10mA$，$V_{ce}=8V$的偏置条件，然后计算出了偏置电阻的阻值，电路图如下所示：其中R_d、R_b作为分压电阻，R_s作为反馈电阻，C作为电路的隔直电容，L_d作为电路的隔交电感，C_f作为电路的电压反相电容，C_x、L_x作为负阻抗变换的负载，它们加上电源退耦电路共同组成了非福斯特电路。元器件数值在下表列出：

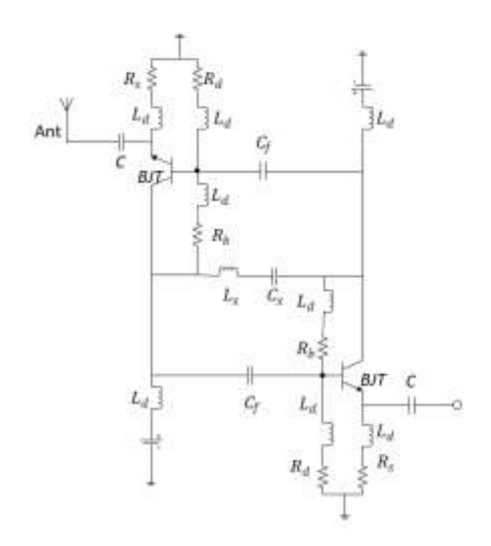


图 6　电路结构图

Fig.6　Circuit structure diagram

表 3 电路元器件数值

Tab.3　Circuit component value

R_s(Ω)	R_b(Ω)	R_d(Ω)	C(nF)	C_f(nF)	C_x(pF)	L_d(mH)	L_x(uH)
390	750	510	10	10	36	6	4.3

考虑到低频天线受到周围环境影响非常大，阻抗测试困难，我们采用电容电感电路来模拟天线的阻抗特性，方便调试。在天线阻抗特性类似于电小鞭状天线的情况下，天线模拟电路很难通过元器件的低阶串并联形式来完全拟合，而使用元器件数量的增加也会带来一些难以说明的寄生效应。经过大量的仿真调试，最终确定了 36pF电容串联 4.3uH电感的组合，图 3 中标号为 non-Foster 曲线给出了其加载非福斯特电路后的阻抗仿真图。

在图中我们可以看出，虚部有了明显的改善，且实部引入的损耗极低。通过仿真结果可以看出，加载非福斯特后的电小蝶形薄膜天线阻抗性能提升显著。

3 样机制作及测试

在确定好尺寸的情况下，我们进行了天线的实物制作，天线是由柔性电路板加工而成，在制作尺寸较大的情况下也能保证很好的精度。电路的尺寸为 47mm×31mm，介质基板材料为 FR4，相对介电常数为 4.4，厚度为 0.8 mm。本文设计的天线及非福斯特电路实物图如图 7 和图 8 所示，



图 7　天线实物图

Fig.7　Antenna physical diagram

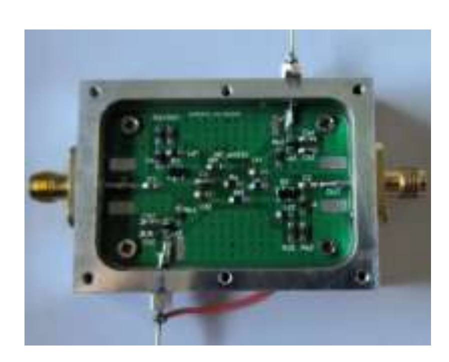


图 8　电路实物图

Fig.8　Circuit physical diagram

天线和电路中间加入了巴伦，我们先后在不同的环境对天线进行了实测，如下图，ground 为水泥地测试结果(红线)，roof 为楼房房顶平台测试结果（蓝线），grassland 为草地测试结果（绿线），但是由于天线工作频段对应的波长太长，实际测试很难不受到周围环境的影响。例如，测试地点附近有山体产生反射。地面本身是不良导体，且其介电常数和导电性也有一定变化。因此这种测试所得的结果，很可能有较大误差，不能完全反映这一天线在实际应用时的性能。

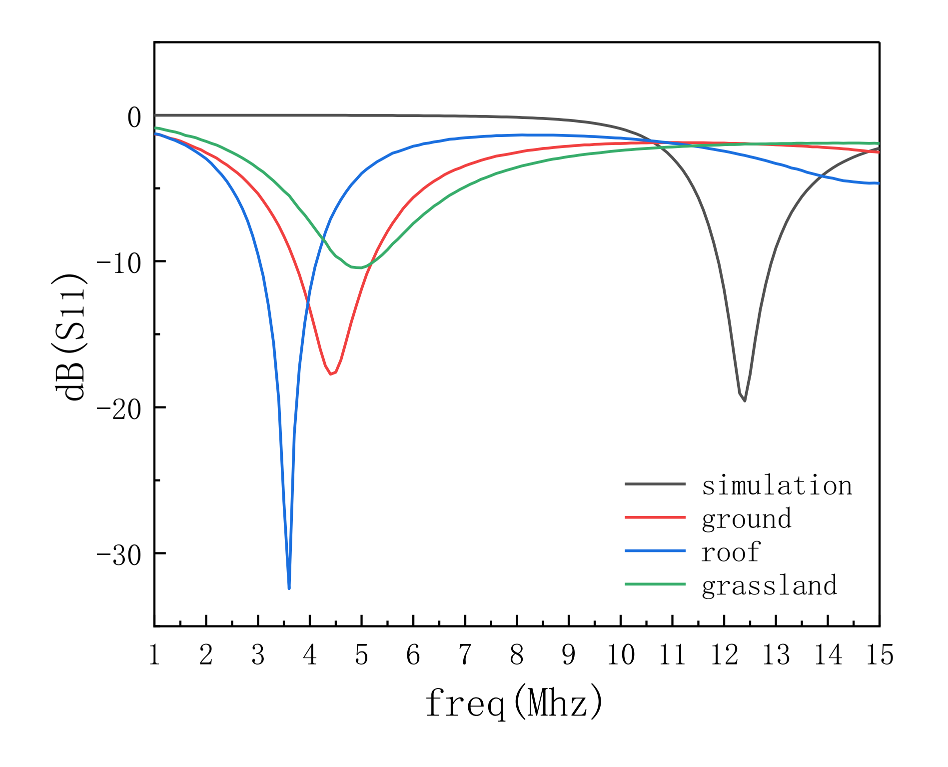


图 9　模拟及在不同环境下的 S_{11} 实测

Fig.9　Simulation and measurement of S11 in different environments

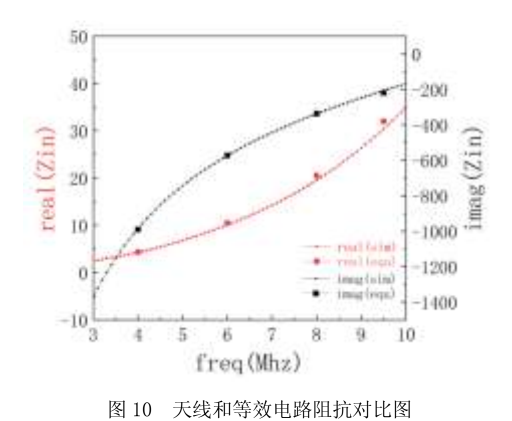


图 10　天线和等效电路阻抗对比图

Fig.10　Comparison of antenna and equivalent circuit impedance

表 4 天线和等效电路阻抗对比

Tab.4　Comparison of antenna and equivalent circuit impedance

	4MHz	6MHz	8MHz
real（sim）	4.3	10.1	19.6
real（equ）	4.3	10.5	20.5

imag（sim）	-985.3	-573.5	-337.7
imag（equ）	-990.3	-572.8	-337.4

在本项研究中，我们首先关注的是非福斯特电路在改善天线性能方面的作用，所以我们决定用天线的等效电路加载非福斯特进行测试。但这也存在一些问题。低阶电路很难完全拟合天线的阻抗，而高阶电路结构复杂，容易带来损耗，引入寄生效应。综合考虑之下，我们决定采用分频段测试：做 4 个等效电路，它们在 4 个频点能够拟合天线的阻抗，这种方法能够保证一定的准确性。我们选取了 4MHz、6MHz、8MHz、9.5MHz 这 4 个频点并作出了它们的等效电路，通过阻抗分析仪进行了实测，其阻抗如图 10 所示。

加载非福斯特改善前后的阻抗如图 11 所示，可以看出仿真与实测结果基本吻合。这说明了经过加载非福斯特电路，对电小蝶形薄膜天线的阻抗有所改善，初步说明了该方案的可行性。

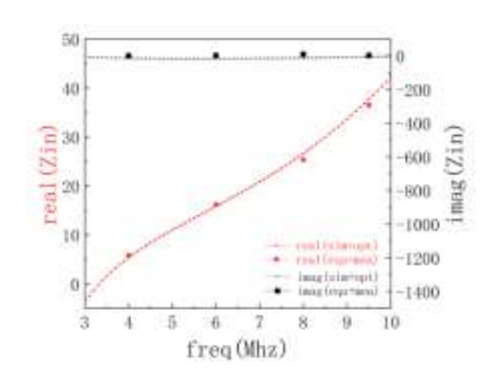


图 11　实测对比图

Fig.11　Measured comparison diagram

表 5 实测对比

Tab.5　Measured comparison

	4Mhz	6MHZ	8MHZ
real（s+o）	5.3	15.8	26.6
real（e+m）	5.77	16.1	25.3
imag（s+o）	-14.2	-16.4	-12.4
imag（e+m）	-0.2	1.9	9.4

在 10MHz 以内，天空背景噪声非常之高，天空温度在几十万到百万 K 这样的量级，例如 10MHz 天空温度在二十几万 K 左右，对应噪声功率密度大约在-140dBm/Hz 这个量级，这与观测设备的电子噪声处于相当或更高的水平[15]，非福斯特匹配电路虽然会增加系统的噪声，但是对系统噪声的影响较小。为了进行精准的测量，我们使用具有较小的噪声功率密度水平的安捷伦 N9020A 频谱分析仪测量非福斯特电路在关闭和打开时的噪声频谱，V=0 和 12V 情况下的总测量噪声值包括非福斯特电路噪声和频谱仪的噪底，非福斯特匹配电路的附加噪声为电路打开和关闭时的测量噪声之差[16][17]，噪声频谱测试结果如图 12 所示，与该频段的天空噪声相比，电路整体噪声功率密度水平较低，满足观测需求，另外与其他文献中的一些非福斯特电路噪声水平相比也是较低的[17][16][17]。

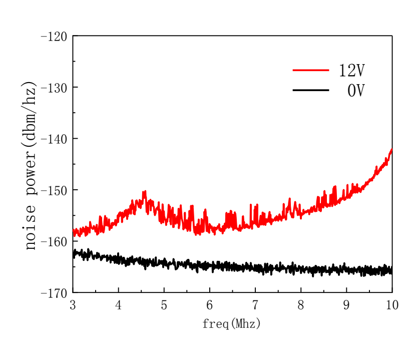


图 12　噪声功率密度测量

Fig.12　Noise power measurement

4 结 论

10MHz 以下的低频射电天文是目前不多的几个没有深入探索的电磁频谱窗口，具有巨大的科学发现潜力。在天线物理长度限制的情况下，如何提高该频段的接收效率，是一个非常值得研究的问题。本文针对于低频月面射电观测提出了一种加载非福斯特匹配电路的电小蝶形薄膜天线的设计方案，并进行了仿真、加工和实测。结果表明，加载非福斯特匹配电路能够大幅改善天线的电抗，使天线在电小尺寸的情况下依然具有不错的阻抗特性，并且电路噪声控制在较好的水平，验证了本文提出的设计方案的可行性。

在后续的工作中，我们将进行引入变压器等阻抗变换电路进一步改善阻抗匹配，进行整体电路的稳定性研究，使用更加简单稳定的运算放大器来组成非福斯特电路，并使用与天线相同的材料作为电路的介质基板，尝试天线与电路的一体化设计，使整体方案集成度更高，为未来月面天文射电天线阵列的低频天线和匹配网络方案提供一些技术储备研究。

An application of non-foster matching circuit in improving lunar low-frequency membrane antenna

Jia Zhou [1,2]、Fengquan Wu[2]、Shijie Sun[2]、Nanben Suo[2]、Jiao Zhang[1]、Xuelei Chen[2]

1 Shanxi University, Taiyuan 030000, China

2 National Astronomical Observatories Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

Abstract：Low-frequency radio observations on the lunar surface have great potential for scientific discovery and are expected to reveal the secrets of the dark age and cosmic dawn of the Universe. This paper proposes a new design for low-frequency radio lunar observation. The non-Foster matching circuit is used to significantly reduce the physical size of the antenna, making it light and easy to deploy on the moon. First, an electrically small membrane antenna which is light，wide temperature range，malleable，foldable, simple to deploy, and with good omnidirectionality is designed，gain is less than 1.92dB in 4-8Mhz and half-beam width is greater than 83 °. Then, a non-Foster matching circuit is employed to improve impedance performance ，the reactance of the antenna is optimized from about -985.3 Ω to-16.5 Ω, and the noise power level is less than - 150 dBm in most frequency range. Finally, The feasibility of the design is preliminarily confirmed by impedance and noise measurement.

Keywords: low-frequency radio astronomical； lunar-based astronomical observation; Membrane antenna ；Electrically Small Antennas ；non-Foster circuits；

参考文献

[1]. “Lunar Crater Radio Telescope (LCRT) on the Far-Side of the Moon”. NASA. 2020-04-07. Retrieved 2020-04-09.

[2]. Burns, Jack O, Tzu-Ching Chang, Richard Bradley, Steven Furlanetto, Alex Hegedus, U Michigan, U Michigan, et al. “A Lunar Farside Low Radio Frequency Array for Dark Ages 21-Cm Cosmology,” n.d., 14.

[3]. McGarey, Patrick, Issa A. Nesnas, Adarsh Rajguru, Matthew Bezkrovny, Vahraz Jamnejad, Jim Lux, Eric Sunada, et al. “How to Deploy a 10-Km Interferometric Radio Telescope on the Moon with Just Four Tethered Robots,” September 6, 2022.

[4]. L.J.Chu,“Physical limitations of omni-directional antennas,”J.Appl.Phys.,vol.19,no.12,pp.1163–1175,Dec.1948.

[5]. A.H.Wheeler,“Fundamental limitations of small antennas,”Proc.IRE,vol.35,no.12,pp.1479–1484,Dec.1947.

[6]. H. Bode, Network Analysis and Feedback Amplifier Design. NewYork: Van Nostrand,1947,p.367.

[7]. R.M. Fano, “Theoretical limitations on the broadband matching of arbitrary impedances,” J.Franklin Inst.,vol.249,pp.57–83,Jan.1950,and pp.139-155,Feb.1950.

[8]. K.A.Obeidat,B.D.Raines,and R.G.Rojas,“Application of characteristic modes and non-Foster multiport loading to the design of broadband antennas,”IEEE Trans.Antennas Propag.,vol.58,no.1,pp.203–207,Jan.2010.

[9]. R. M. Foster. A Reactance Theorem[J].Bell System Tech. J.,1924, vol. 3:259-267.

[10].J.G. Linvill: “Transistor negative impedance converters,” Proc. IRE 41(1953)725

[11].Andrew Harris, Glen A. Myers. An Investigation of Broadband Miniature Antennas[R]. Monterey CA: Naval Post graduate School,TechincalReport,1968.

[12].Sussman-Fort S. E, Rudish R. M. Non-Foster impedance matching of electrically small antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas

and Propagation,2009,57(8):2230-2241.

[13].Yang H., Kim I., Kim K. Non-Foster matching of a resistively loaded vee dipole antenna using operational amplifiers[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2016,64(4): 1477-1482.

[14].Tang M, Shi T, Ziolkowski R W. Electrically small, broadside radiating Huygens source antenna augmented with internal non-Foster elements to increase its bandwidth[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,2016.

[15].KONOVALENKO A A,FALKOVICH I S,KALINICHENKO N N,et al. Thirty-element active antenna array as a prototype of a huge low-frequency radio telescope[J].Experimental Astronomy,2003,16(3): 149-164

[16].M.M.Jacob and D.F.Sievenpiper,“Gain and noise analysis of non-Foster matched antennas,”IEEE Trans.Antennas Propag.,vol.64,no.12,pp.4993–5004,Dec.2016.

[17].T.-Y.Shih and N.Behdad,“Wideband,non-Foster impedance matching of electrically small transmitting antennas,”IEEE Trans.AntennasPropag.,vol.66,no.11,pp.5687–5697,Nov.2018.

[18].T. Shi, M. -C. Tang, Z. Wu, H. -X. Xu and R. W. Ziolkowski, "Improved Signal-to-Noise Ratio, Bandwidth-Enhanced Electrically Small Antenna Augmented With Internal Non-Foster Elements," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 4, pp. 2763-2768, April 2019.

[19].D. S. Nagarkoti, Y. Hao and K. Z. Rajab, "Noise measurements of a non-Foster circuit for matching of a receiver antenna," 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Lisbon, Portugal, 2015, pp. 1-3.

收稿日期：2023-01-10； 修订日期：2023-00-00

***基金项目**：SKA专项（2022SKA0110100）资助，国家自然科学基金资助项目(12273070，11473044, 11973047)资助，中国科学院科研仪器设备研制项目（ZDKYYQ20200008）

作者简介：周嘉(1996-)，男，硕士，研究方向：射电天文、天线与匹配电路。 Email:zj19960830@126.com

通信作者：吴锋泉，男，博士，研究方向：射电天文、宇宙学。Email：wufq@bao.ac.cn

通信作者：张骄，女，博士，研究方向：射电天文、阵列设计。Email：zhangjiao@sxu.edu.cn